

Федеральное государственное автономное
образовательное учреждение высшего образования
«СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Политехнический институт

Кафедра «Электрические станции и электроэнергетические системы»

УТВЕРЖДАЮ

Заведующий кафедрой



подпись

И. В. Коваленко

инициалы, фамилия

« 5 » 06 2017 г.

АВТОРЕФЕРАТ ПО МАГИСТЕРСКОЙ ДИССЕРТАЦИИ

«Методы анализа надежности электроустановок на основе дерева отказов»

Утверждена приказом по университету №17046/с от 10 ноября 2015 г.

13.04.02.02 «Электроэнергетические системы, сети, линии электропередач,
их режимы, устойчивость и надежность»

13.04.02 «Электроэнергетика и электротехника»

Научный руководитель




Подпись, дата

проф., канд.тех.наук В. А. Тремясов

должность, ученая степень

инициалы, фамилия

Выпускник



Подпись, дата

А. А. Константинов

инициалы, фамилия

Красноярск 2017

Работа выполнена на кафедре «Электрические станции и электроэнергетические системы» ФГАОУ ВО «СИБИРСКИЙ ФЕДЕРАЛЬНЫЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Научный руководитель: кандидат технических наук, профессор
Тремясов Владимир Анатольевич

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Магистерская диссертация на тему «Методы анализа надежности электроустановок на основе дерева отказов» содержит 35 иллюстраций, 6 приложений, 45 использованных источников и выполнена на 102 страницах.

Актуальность исследования заключается в том, что совершенствование существующих методов анализа надежности позволит повысить точность оценок технико-экономических показателей различных вариантов схем электрических сетей и выбрать наиболее эффективный вариант электроснабжения при проектировании.

Вопрос о надежности систем электроснабжения является одним из основных вопросов, которые предъявляются к ним еще на стадии проектирования.

Создание новых электроустановок, расширение и без того сложных систем электроснабжения требует таких методов анализа и расчета надежности, которые позволили бы при проектировании учесть опыт эксплуатации, рассчитать надежность, проанализировать варианты обеспечения надежности, обосновать необходимость ее увеличения и прогнозировать надежность новых установок.

Некоторые разновидности отказов, приводящих к нарушению электроснабжения, могут возникать по независящим от человека причинам (отказы общей причины), которые появляются вследствие стихийных бедствий, наводнений, землетрясений и других природных явлений. Однако достаточно большое количество отказов могут возникать из-за допущенной при проектировании ошибки (человеческого фактора) из-за не учёта некоторых факторов при расчетах показателей надежности. Ошибки достаточно трудно обнаружить и проявляют себя они, как правило, уже на стадии длительной эксплуатации электрооборудования в виде аварий, либо отказов электроснабжения. Эти ошибки возникают из-за того, что процесс анализа надежности достаточно трудоемкий и затратный по времени и ресурсам, а его результаты проблематично проверить.

Предмет исследования – анализ надежности электрических сетей.

Цель проводимого исследования – совершенствование существующего метода дерева отказов для анализа надежности электрической сети, реализация его в виде программного обеспечения.

Выдвинутая цель основывается на **гипотезе**, что метод дерева отказов является наиболее эффективным методом анализа надежности, так как он реализован на основе дедуктивного метода (причины – следствия), что дает данному методу достаточно серьезные возможности для поиска причин отказов систем, так как он дает наглядную и подробную схему взаимосвязей элементов. Таким образом, в сочетании с различными методиками расчета показателей надежности, и реализованный в виде ПО, данный метод позволит получать более точные результаты расчетов показателей надежности и выбрать эффективный вариант электроснабжения.

Достижение поставленной цели и доказательство выдвинутой гипотезы потребовали решения следующих задач:

- анализ и классификация методик расчета показателей надежности;
- выбор и обоснование метода расчета;
- анализ математического аппарата;
- создание алгоритма для программного обеспечения;
- разработка программного обеспечения;
- испытание метода расчета и программного обеспечения на примере электрической сети Красноярского края;

Научная новизна работы заключается в следующем:

- исследован метод ДО для анализа надежности электрической сети;
- выявлен перспективный метод ДО с использованием кинетической теории;
- разработано ПО по выбранному методу для проведения расчетов.

Теоретическая значимость диссертации состоит в дальнейшем усовершенствовании метода дерева отказов с использованием кинетической теории для анализа надежности ЭЭС, что позволит получать более точные показатели надежности для различных вариантов схем, тем самым мы повысим эффективность анализа надежности.

Практическая ценность работы определяется возможностью применения результатов исследования в расчетах и анализе надежности ЭЭС, использованием разработанного ПО для проведения расчетов.

Структура диссертации. Диссертация состоит из аннотации, содержания, введения, четырех глав, заключения, библиографического списка (45 источников) и шести приложений.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во **введении** обосновывается выбор темы и актуальность исследования, формулируются цель и задачи диссертации, а также новизна выполняемой работы.

В первой главе «Методы и модели исследования надежности электроэнергетических установок и систем» были исследованы различные математические модели и методы для анализа надежности электроустановок и систем.

В данной главе были рассмотрены:

1) Учет надежности при проектировании и эксплуатации ЭЭС;

Здесь были рассмотрены основные понятия и определение надежности, а также отмечены задачи и вопросы, которые решаются при проектировании энергосистем с учетом надежности. Также были рассмотрены различные численные оценки, используемые для анализа надежности и позволяющие делать информативные выводы о спроектированной системе.

2) «Вероятностные модели для оценки надежности электроустановок»

Здесь была рассмотрена математическая модель надежности, описывающая влияние времени эксплуатации на интенсивность потока отказов электрооборудования. Также было рассмотрено влияние времени использования на вероятность безотказной работы и вероятность отказа.

3) «Метод минимальных путей сечений»

В данном пункте был проанализирован метод минимальных путей и сечений. Были рассмотрены основные понятия и определения, а также математические выражения, позволяющие провести расчет вероятностей работоспособного и неработоспособного состояний системы.

4) «Модели надежности электроустановок на основе марковских процессов»

Здесь были рассмотрены математические модели, основанные на марковских процессах. Были определены основные положения данного метода, детально рассмотрен математический аппарат, а также было рассмотрено влияние кратности резервирования на расчет и численные значения показателей надежности.

5) «Моделирование погодных условий при анализе надежности ЛЭП»

В данном пункте был проведен анализ влияния погодных условий на показатели надежности ЛЭП, рассмотрены модели со средневзвешенными интенсивностями и двухпогодная марковская модель, изучен математический аппарат, позволяющий учесть погодные условия при проведении анализа надежности.

Вторая глава «Метод дерева отказов для оценки надежности электрических систем» посвящена исследованию анализа надежности на основе метода дерева отказов (ДО). При исследовании данного метода были рассмотрены следующие разделы:

1) «Процедура построения ДО для анализа надежности электрической сети».

В данном разделе было рассмотрено понятие дерева отказов. Также была составлена структура построения дерева отказов:

- а) отказ системы, или происшествие (конечное событие);
- б) дерево отказов состоит из последовательностей событий, которые ведут к отказам системы или происшествию;
- в) последовательности событий строятся с помощью логических знаков «И», «ИЛИ» и др.;
- г) событие над логическим знаком и все события, которые имеют элементарные причины отказов, помещаются в прямоугольнике, а само событие описано в этом прямоугольнике;
- д) последовательности в конечном итоге ведут к исходным причинам, для которых имеются данные по частоте отказов. Эти исходные причины обозначают кругом. Они представляют разрешающую способность данного дерева отказов.

Проанализированы основные логические символы и символы событий, используемые при построении ДО. Также были рассмотрены стадии проведения синтеза и анализа ДО.

- 2) «Методы ДО, применяемые в расчетах надежности электрических систем».

В данном пункте были рассмотрены основные методы ДО, используемые в расчетах надежности. При проведении анализа были выделены несколько методов:

- а) качественный метод ДО для оценки надежности систем путем формирования МСО;
- б) количественный анализ показателей надежности по характеристикам МСО;
- в) метод ДО для оценки надежности на основе синтеза функции отказа
- г) метод расчета показателей надежности на основе кинетической теории ДО.

Для проведения дальнейшего исследования нами был выбран метод на основе кинетической теории ДО. Данный метод, по сравнению с другими, обладает некоторыми преимуществами:

- метод дает представление о поведении системы, но требует от специалиста по надежности глубокого понимания системы и конкретного рассмотрения каждый раз только одного определенного отказа;
- помогает дедуктивно выявлять отказы;
- позволяет выполнить качественный и количественный анализ надежности;
- дает конструкторам, пользователям и руководителям возможность наглядного обоснования конструктивных изменений и анализа компромиссных решений.

Кинетическая теория ДО (теория кинетического дерева) была разработана американским ученым Уильямом Везели для расчетов

показателей надежности атомных электростанций (АЭС). Основным подходом, используемым в кинетической теории, является то, что для любого компонента, МСО, минимального пути отказа или для системы полную информацию можно получить из четырех основных характеристик надежности элемента:

- 1) вероятность безотказной работы элемента;
- 2) вероятность появления отказа элемента;
- 3) интенсивность отказа элемента;
- 4) интенсивность восстановления элемента;

Сущность кинетической теории заключается в том, что когда эти четыре характеристики определены для каждого элемента, то используя вероятностный анализ событий, которые происходят в общий момент времени t или на интервале времени $[t, t + \Delta t]$. Составленные и решенные дифференциальные уравнения для данного интервала или момента времени позволяют получить показатели надежности, рассчитанные с учетом изменения характеристик элементов во времени. Таким образом, полная информация получается за расчетное время эксплуатации, и эта информация вычисляется достаточно просто, так как многочисленными комбинациями уравнений, содержащими дифференциалы второго порядка, можно пренебречь. Причем если есть необходимость в информации только об отказах, тогда интенсивность восстановления в решаемых уравнениях можно не учитывать.

Для проведения анализа мы будем опираться на трактовку кинетической теории Балбира Диллона. Эта интерпретация метода основывается на построении ДО, определении МСО и расчете показателей надежности для каждого МСО и завершающего события по составленным формулам.

При определении количественных показателей надежности на уровне сечений, соответствующих элементарным событиям и завершающему событию, используются следующие обозначения:

для элементарных событий:

λ - постоянная интенсивность отказов элемента;

μ - постоянная интенсивность восстановления элемента;

t - требуемая наработка по времени;

$F(t)$ - вероятность того, что в момент времени t элемент находится в исправном состоянии;

$F_i(t)$ - вероятность того, что элемент впервые выходит из строя в момент времени t ;

W - вероятность того, что в интервале времени $[t, t + \Delta t]$ элемент выходит из строя (появляется элементарное событие);

W_i - вероятность того, что элемент впервые выходит из строя в интервале времени $[t, t + \Delta t]$.

для сечений:

$\lambda'(t)$ - интенсивность отказов на уровне сечений в момент времени t ;

$\mu'(t)$ - интенсивность восстановлений на уровне сечения в момент времени t .

для завершающего события:

$\lambda_{3c}(t)$ - интенсивность отказов на уровне завершающего события в момент времени t ;

$\mu_{3c}(t)$ - интенсивность восстановлений на уровне завершающего события в момент времени t .

Вероятность отказа на уровне сечения:

$$F_j(t) = \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i}{\prod_{i=1}^n (\lambda_i + \mu_i)}$$

Вероятность появления первого отказа на уровне сечения:

$$W_j = \frac{\prod_{i=1}^n \lambda_i}{\prod_{i=1}^n (\lambda_i + \mu_i)} \cdot \sum_{i=1}^n (\mu_i)$$

Интенсивность отказов на уровне сечения:

$$\lambda_j'(t) = \frac{W_i(t)}{1 - F_i(t)}$$

Интенсивность восстановлений находим по формуле:

$$\mu_j'(t) = \frac{W_i(t)}{F_i(t)}$$

Интенсивность отказов и интенсивность восстановлений на уровне завершающего события:

$$\lambda_{3c}(t) = \frac{W_{3c}(t)}{(1 - F_{3c}(t)) \cdot t}$$

$$\mu_{3c}(t) = \frac{W_{3c}(t)}{F_{3c}(t) \cdot t}$$

3) «Алгоритмы формирования минимальных сечений отказа»

Здесь был проведен анализ различных алгоритмов, реализуемы при нахождении МСО. При проведении анализа были выделены алгоритмы «снизу-вверх» и «сверху-вниз». Были выделены структуры алгоритмов, этапы их реализации и исследован математический аппарат.

4) «Критерии значимости элементов и МСО»

В данном пункте были рассмотрены критерии значимости элементов, исследован математический аппарат для их вычисления, основные положения и области применения данного метода оценки надежности.

В **третьей главе** «Разработка алгоритма и компьютерной программы для расчета показателей надежности электроустановок» представлены описание программы, структурная схема алгоритма ее работы (рисунок 1), а также был проведен расчет контрольного примера для того, чтобы удостовериться в отсутствии ошибок в работе программы.

Характеристики ПО:

Операционная система: любая.

Среда исполнения: веб-браузер. Подойдет любой веб-браузер с поддержкой javascript (предпочтительно использование GoogleChrome).

Язык интерфейса: русский.

Язык программирования: javascript.

Расширение исполняемого файла: .html

Устройство для работы: ПК, КПК, планшет, смартфон.

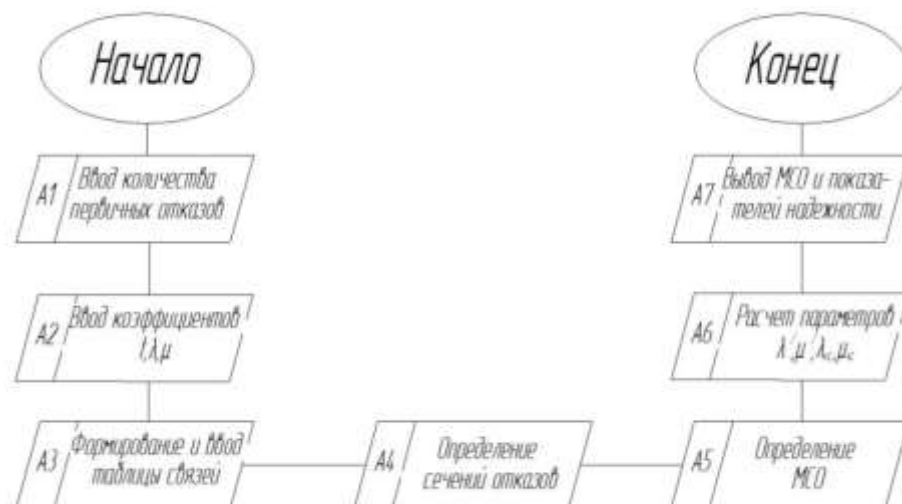


Рисунок 1 – Структурная схема алгоритма работы ПО

Описание структурной схемы алгоритма:

А1. На данном этапе вводится количество первичных отказов. Следует отметить, что необходимо четко разделять разновидности отказов одного элемента, так, как для каждого отказа требуется свое обозначение. Все это необходимо для того, чтобы четко разделить виды отказов, что поможет избежать сложности в установлении причинно-следственных связей.

А2. Производится ввод индексов отказов и параметров отказов (интенсивность отказов и интенсивность восстановления), требуемые для проведения дальнейших расчетов показателей надежности. Также на данном этапе вводится расчетный период времени, в котором производятся вычисления, измеряемый в годах.

А3. Затем необходимо составить таблицу связей. Таблица связей является описанием составленного ДО в виде таблицы, где каждая строка описывает одну логическую связь элементов ДО. В первом столбце находится описываемый элемент (промежуточное или завершающее событие), во втором столбце – логический знак, связывающий данные события, в третьем и последующих – элементы, входящие в логическую связь (как промежуточные события, так и первичные отказы). Пример составления таблицы связей представлен в пункте 3.3.

А4. Определение сечений отказов. Здесь программа производит расчет всех доступных сечений отказов без выделения МСО. Данный этап позволяет проанализировать полученную таблицу связей с целью выявления ошибок для дальнейшего их устранения.

А5. На данном этапе происходит анализ полученных сечений и выделение МСО.

А6. В дальнейшем после получения МСО программа анализирует все первичные отказы элементов, входящих в данные МСО. И используя формулы для расчета показателей надежности, представленные в пункте 2.3.4, производит расчет показателей надежности для каждого МСО и для завершающего события.

А7. На последнем этапе производится вывод в рабочую область полученных показателей надежности для каждого МСО соответственно и для завершающего события. По полученным значениям можно судить о надежности выбранной схемы, а также определить комплекс мероприятий для повышения показателей надежности.

В **четвертой главе** «Анализ надежности электрической сети с применением разработанной программы для ПК» анализируется ЭЭС (рисунок 2). На данном этапе была составлена упрощенная схема системообразующей сети 500 кВ.

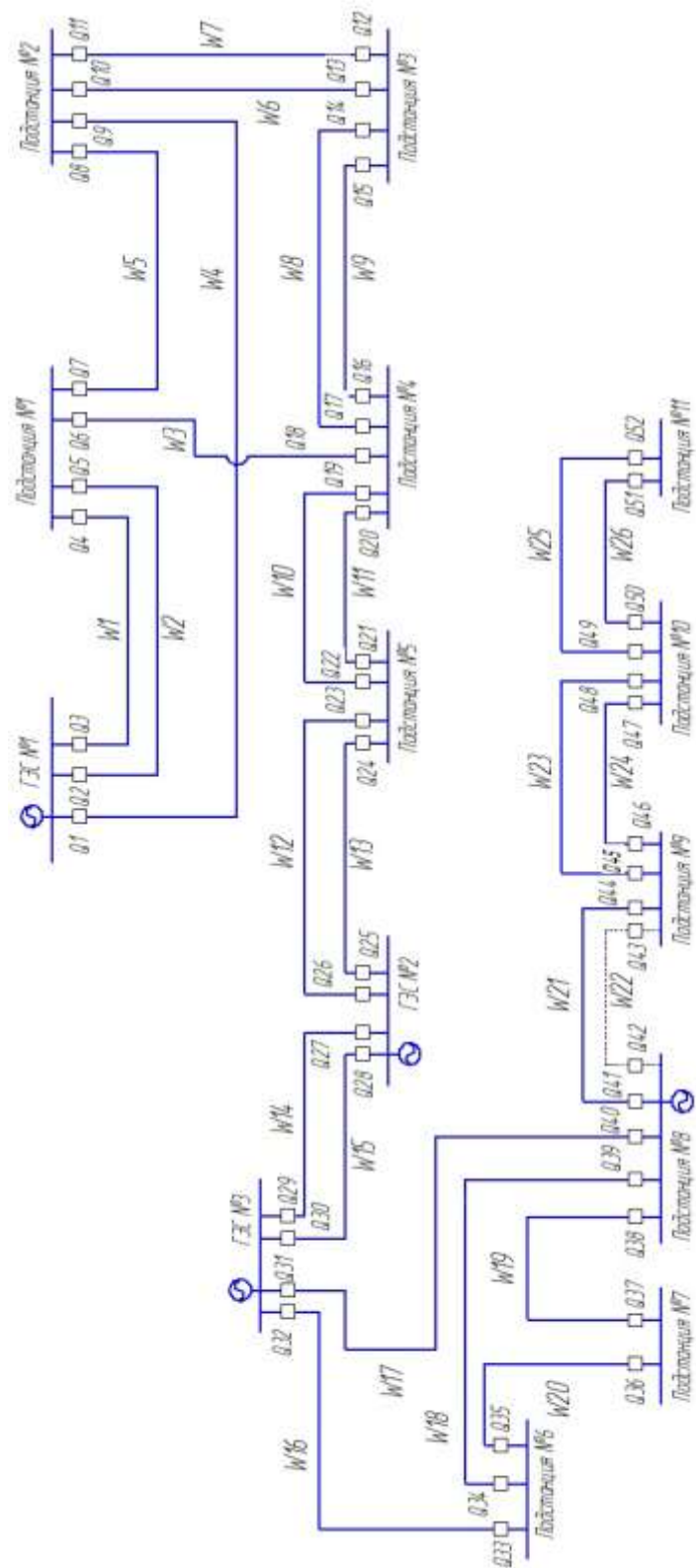


Рисунок 2 – Упрощенная схема системообразующей сети 500 кВ

При упрощении расчётной электрической схемы будем использовать следующие допущения:

- схема ОРУ каждой подстанции упрощается до одиночной несекционированной системы шин.
- количество выключателей на одно присоединение упрощается до одного.
- системы генерации при проведении расчетов не учитываются и заменяются эквивалентным источником питания.
- все выключатели заменяются на эквивалентные воздушные или элегазовые.

Затем были рассчитаны показатели надежности для каждой ЛЭП с учетом выключателей (таблица 1).

Таблица 1 – Показатели надежности ЛЭП с учетом выключателей

Обозначение	Обозначение в таблице связей	Воздушные выключатели		Элегазовые выключатели	
		λ_i 1/год	μ_i 1/год	λ_i 1/год	μ_i 1/год
W1	1	0,66	710	0,38	700
W2	2	0,66	710	0,38	700
W3	3	1,14	710	0,86	700
W4	4	1,09	710	0,81	700
W5	5	0,94	710	0,66	700
W6	6	0,58	710	0,30	700
W7	7	0,58	710	0,30	700
W8	8	0,86	710	0,58	700
W9	9	0,86	710	0,58	700
W10	10	0,58	710	0,30	700
W11	11	0,58	710	0,30	700
W12	12	0,36	710	0,18	700
W13	13	0,34	710	0,16	700

В качестве рассматриваемого объекта мы провели расчеты для группы из трех подстанций: Подстанция №3, Подстанция №4, Подстанция №5. Расчеты проводились для каждого из двух выбранных нами завершающих событий:

- прекращение питания одной из трех подстанций.
- прекращение питания трех подстанций одновременно.

Далее были составлены до для каждого завершающего события. При составлении ДО была использована блочная структура, так как присутствовали повторяющиеся фрагменты схемы.

Затем были проведены расчеты показателей надежности (таблица 2,3).

Таблица 2 – Результаты расчетов ДО «Погашение одной из трех подстанций»

МСО	Расшифровка МСО	С воздушными выключателями		С элегазовыми выключателями	
		λ_i 1/год	μ_i 1/год	λ_i 1/год	μ_i 1/год
12,13,10,11	W12,W13,W10,W11	0,639	28,4	0,096	28,0
12,13,1,2,4	W12,W13,W1,W2,W4	0,551	35,5	0,088	35,0
10,11,1,2,4	W10,W11,W1,W2,W4	1,038	35,5	0,210	35,0
12,13,3,4,5	W12,W13,W3,W4,W5	0,841	35,5	0,192	35,0
12,13,3,6,7	W12,W13,W3,W6,W7	0,448	35,5	0,066	35,0
12,13,3,8,9	W12,W13,W3,W8,W9	0,729	35,5	0,151	35,0
10,11,3,4,5	W10,W11,W3,W4,W5	1,594	35,5	0,457	35,0
10,11,3,6,7	W10,W11,W3,W6,W7	0,917	35,5	0,157	35,0
10,11,3,8,9	W10,W11,W3,W8,W9	1,378	35,5	0,360	35,0
8,9,1,2,4	W8,W9,W1,W2,W4	1,562	35,5	0,483	35,0
8,9,3,4,5	W8,W9,W3,W4,W5	2,418	35,5	1,062	35,0
8,9,3,6,7	W8,W9,W3,W6,W7	1,378	35,5	0,360	35,0
Завершающее событие		1,12	34,9	0,307	34,416

Таблица 3 – Результаты расчетов ДО «Погашение трех подстанций одновременно»

МСО	Расшифровка МСО	С воздушными выключателями		С элегазовыми выключателями	
		λ_i 1/год	μ_i 1/год	λ_i 1/год	μ_i 1/год
12,13,1,2,4	W12,W13,W1,W2,W4	0,551	35,5	0,088	35,0
12,13,3,4,5	W12,W13,W3,W4,W5	0,841	35,5	0,192	35,0
12,13,3,6,7	W12,W13,W3,W6,W7	0,448	35,5	0,066	35,0
Завершающее событие		0,627	35,5	0,115	35,0

Затем был произведен расчет критериев значимости для исходных отказов в МСО (таблица 4).

Таблица 4 – Критерии значимости элементов

Обозначение	ДО «Погашение трех подстанций одновременно»		ДО «Погашение одной из трех подстанций»	
	Воздушные выключатели	Элегазовые выключатели	Воздушные выключатели	Элегазовые выключатели
W1	0,23	0,16	0,016	0,022
W2	0,23	0,16	0,016	0,022
W3	0,77	0,84	0,063	0,116
W4	0,81	0,88	0,051	0,110
W5	0,58	0,72	0,039	0,088
W6	0,18	0,12	0,012	0,014
W7	0,18	0,12	0,013	0,014
W8	-	-	0,011	0,089
W9	-	-	0,011	0,089
W10	-	-	0,948	0,897
W11	-	-	0,948	0,897
W12	1,0	1,0	0,931	0,872
W13	1,0	1,0	0,931	0,872

Заключение

1. Достаточно большое разнообразие математического аппарата, применяемого при расчетах показателей надежности отдельных элементов или электрических систем при проектировании, эксплуатации, позволяет учесть достаточно широкий спектр условий, которые имеют влияние на возникновении различных аварийных ситуациях.

2. Для уменьшения вероятности возникновения аварии на этапе проектирования производится оценка составленных схем электроснабжения, по различным критериям, анализируя которые можно улучшить показатели надежности и как следствие уменьшить возможный экономический ущерб от перерыва электроснабжения.

3. Применение метода ДО для анализа надежности позволяет даже без использования математического аппарата вычисления показателей надежности по МСО наглядно оценить состояние спроектированной схемы электрической сети, выявить слабые элементы для различных видов отказов системы и предположить различные варианты для улучшения надежности.

4. Для проведения дальнейших расчетов нами был выбран метод, основанный на кинетической теории ДО. Данный метод по сравнению с другими, представленными выше, имеет ряд несомненных преимуществ:

а) метод дает представление о поведении системы, но требует от специалиста по надежности глубокого понимания системы и конкретного рассмотрения каждый раз только одного определенного отказа;

б) помогает дедуктивно выявлять отказы;

в) позволяет выполнить качественный и количественный анализ надежности;

г) дает конструкторам, пользователям и руководителям возможность наглядного обоснования конструктивных изменений и анализа компромиссных решений.

Но существуют и недостатки, которые снижают эффективность данного метода:

а) реализация данного метода при ручном счете требует существенных затрат по времени и ресурсам;

б) сложно учесть состояния частичного отказа элементов, поскольку при применении метода, как правило, считают, что система находится либо в исправном состоянии, либо в состоянии отказа;

в) большие усилия, требуемые для охвата всех видов отказа.

5. Разработанное ПО позволяет провести количественный анализ показателей надежности энергосистемы, провести сравнение различных вариантов электрических схем, опираясь на качественный и количественный анализ проведенных вычислений, определить оптимальный вариант с точки зрения показателей надежности.

6. По результатам проведенных нами расчетов можно сделать вывод, что наиболее уязвимыми, приводящим к погашению одной или нескольких подстанций, являются линии W3, W4, W5 ввиду своей большой протяженности и отсутствию резервирования, так как МСО с этими ЛЭП имеют самые большие интенсивности отказов исходя из расчетов, представленных в таблицах 4.5 и 4.6. Также данные выводы подтверждают расчеты критериев значимости элементов, представленные в таблице 4.10. Комбинация отказов этих линий наряду с возникновением других отказов может отрицательно сказаться на снабжении электроэнергией некоторых районов.

7. Также хотелось бы отметить, что линии W12 и W13 можно отнести к группе элементов, требующих особого внимания, потому что только эти две линии обеспечивают питанием группу подстанций со стороны ГЭС №2, отказ которых может привести к таким последствиям, как отключение потребителей категорий 2 и 3 ввиду ограничения по пропускной способности ЛЭП, возникновению тяжелой аварийной ситуации из-за нарушения условий статической и динамической устойчивости

энергосистемы и к ряду других последствий, приводящих к нарушению стабильной работы подстанций, и как следствие к экономическому ущербу.

8. Исходя из полученных результатов можно сделать вывод о том, что замена воздушных выключателей на элегазовые при сохранении структуры схемы приводит к улучшению показателей надежности.

Основные положения диссертации отражены в 1 публикации:

Константинов А. А. Анализ надежности электрической сети на основе кинетической теории дерево отказов. Электронный сборник международной конференции студентов, аспирантов и молодых ученых «Перспективы-2016». 2016.